

## EXAMEN DE ELECTRÓNICA FUNDAMENTAL

Resolver cada **problema en hojas separadas** y **escribiendo de un solo lado de la hoja**.

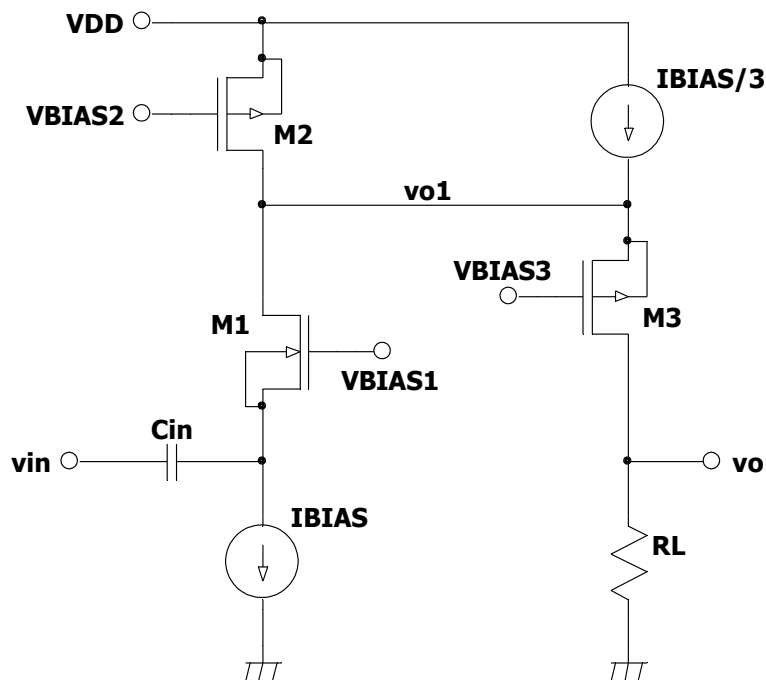
Duración de la prueba: 3 horas 30 minutos.

En todas las partes se deberá fundamentar claramente la deducción que conduce al resultado para que el mismo sea considerado.

La prueba es **sin** material.

Los puntajes de los problemas se indican sobre un total de 100 puntos.

### PROBLEMA 1 (40 puntos)



En el amplificador de dos etapas de la figura.

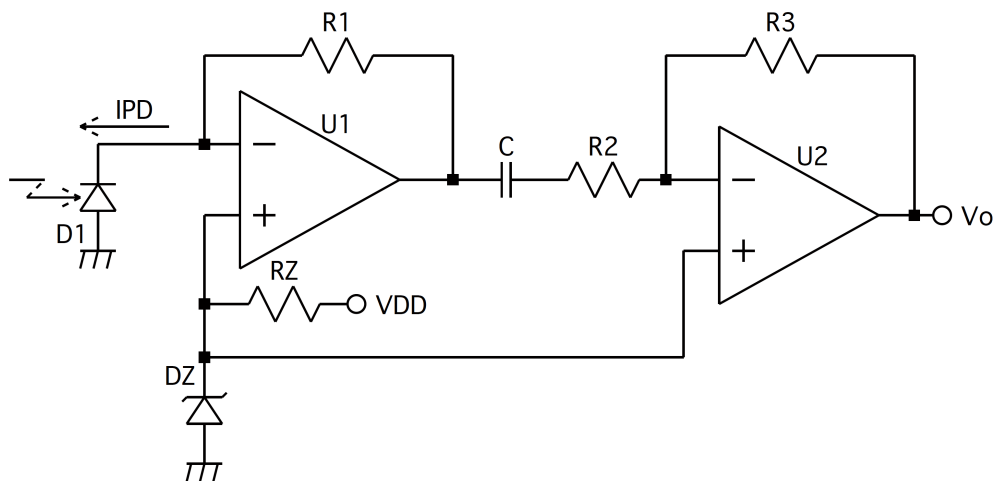
- a)
  - i) Determine la corriente continua por cada uno de los transistores y la tensión continua entre el source de M1 y tierra, en la salida de la primer etapa ( $v_{o1}$ ) y en la salida del amplificador ( $v_o$ ).
  - ii) ¿Circula corriente por la conexión de  $v_{o1}$  a la entrada de la segunda etapa? En caso de respuesta afirmativa indique su valor y en qué dirección circula.
- b) Hallar la ganancia de cada una de la etapas a frecuencias medias y la ganancia total del amplificador.
- c) Determine la capacidad  $C_{in}$  para que la frecuencia de corte inferior sea 1 kHz.

Datos:

$V_{DD}=10\text{ V}$ ,  $V_{BIAS1}=5.4\text{ V}$ ,  $V_{BIAS2}=8.0\text{ V}$ ,  $V_{BIAS3}=7.0\text{ V}$ ,  $I_{BIAS}=0.75\text{ mA}$ ,  $R_L=20\text{ k}\Omega$   
 $V_{t0n}=-V_{t0p}=1\text{ V}$ ,  $\delta_n=\delta_p=0.3$ ,  $\beta_n=3.5\text{ mA/V}^2$ ,  $\beta_p=2\text{ mA/V}^2$ ,  $V_{an}=V_{Ap}=\text{infinita}$

**PROBLEMA 2 (40 puntos)**

El circuito de la figura amplifica la señal proveniente del fotodiodo D1. En lo que sigue se supondrá que el fotodiodo se comporta como una fuente de corriente ideal con corriente continua  $I_{PD}$  y una componente de corriente sinusoidal de amplitud  $i_{pd} = 50 \text{ nA}$  y frecuencia  $f_{in}$ . En todo el problema se supondrá que  $f_{in}$  se encuentra dentro de la banda pasante de todo el circuito y que el diodo Zener opera en la zona Zener.



- a) ¿En qué rango puede variar  $I_{PD}$  para que el circuito funcione correctamente ?
- b) Determinar la amplitud de la señal sinusoidal en la salida  $v_o$  y las frecuencias de corte inferior y superior de la transferencia  $v_o/i_{pd}$  del circuito. A los efectos de determinar la frecuencia de corte superior se podrá suponer que la misma es tal que cumple:  $R2 \gg 1/(2\pi f C)$ . Observar que para el cálculo de la frecuencia de corte inferior, el amplificador operacional se podrá considerar ideal.
- c) ¿Cuánto vale la tensión dc a la salida  $v_o$  si se considera que el operacional de la salida es ideal?. Si se consideran los datos del operacional real, ¿en qué rango puede variar en el peor caso la tensión dc a la salida ?

Datos:

VDD= 5 V

Dz:  $V_z=2.5 \text{ V}$

$R1= 1 \text{ MOhm}$ ,  $R2= 10 \text{ kOhm}$ ,  $R3= 200 \text{ kOhm}$ ,  $C= 15 \text{ nF}$ .

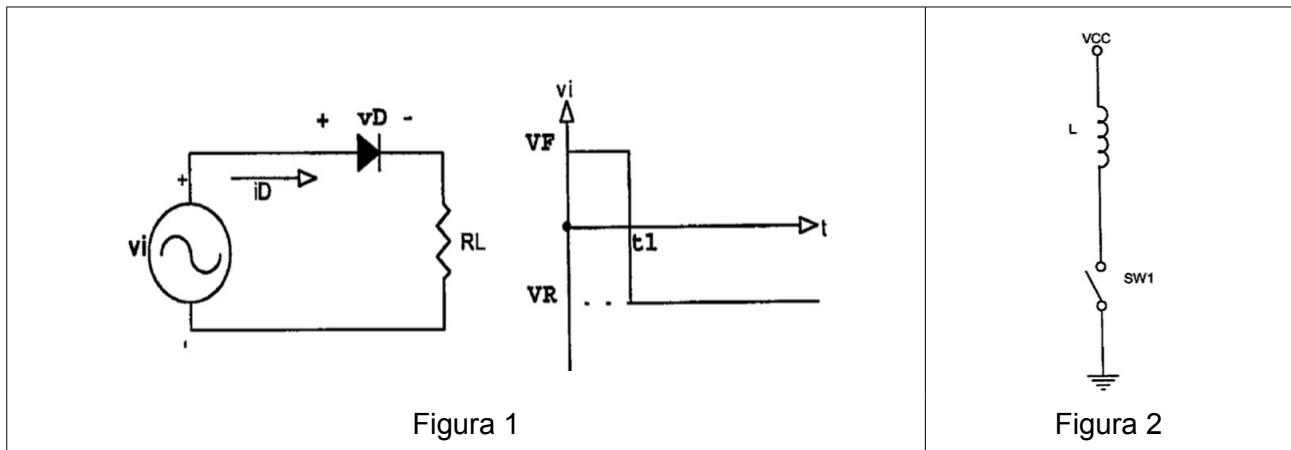
Ambos amplificadores operacionales son del mismo modelo y tienen los siguientes datos:

A0	fT	ICMR	OSW	Voffset	Ibias	Ioffset
106 dB	1 MHz	[1 V ... 3.5 V]	[0.5 V ... 4.5 V]	5 mV max	100 nA max, entrantes al operacional	10 nA max

**PREGUNTA (20 puntos)**

a) Se considera la conmutación de un diodo pn de operación en directa a inversa, como se muestra en la Figura 1. Graficar la evolución en función del tiempo de los concentración de portadores minoritarios en exceso a uno de los lados de la unión (pn – pn0), la corriente por el diodo  $i_D$ , y la tensión en el diodo  $v_D$ . Explicar la razón física por la que se tiene el comportamiento graficado, describiendo qué ocurre en cada una de las zonas relevantes presentadas. Indicar en las gráficas cuál es el tiempo de recuperación inversa ( $t_{rr}$ ) del diodo.

b) Si se tiene el circuito de la Figura 2, en que la llave SW1, abre y cierra periódicamente, indicar cómo se conecta al mismo un diodo de protección de "rueda libre", por qué es necesario el mismo, cómo actúa el mismo como protección y por qué y, en qué situación puede ser necesario que su tiempo de recuperación inversa sea bajo.



# Examen de Electrónica Fundamental - Diciembre 2023

## Problema

a) i)  $I_{D1} = I_{BIAS} = 0,75 \text{ mA} \Rightarrow \boxed{I_{D1} = 750 \mu\text{A}}$

Asumo  $M_1$  saturado:  $I_{D1} = \frac{\beta_n}{2(1+\delta_n)} (V_{BIAS1} - V_{S1} - V_{ton})^2$

$\Rightarrow V_{S1} = V_{BIAS1} - V_{ton} \pm \sqrt{\frac{2(1+\delta_n)I_{D1}}{\beta_n}} = 3,65 \text{ V}$   
 por condición de no corte de  $M_1 \Rightarrow \boxed{V_{S1} = 3,65 \text{ V}}$

Asumo  $M_2$  saturado:

$I_{D2} = \frac{\beta_p}{2(1+\delta_p)} (V_{DD} - V_{BIAS2} - |V_{top}|)^2 = 769 \mu\text{A}$   
 $1\text{V} > 0\text{V} \Rightarrow \text{se cumple condición de no corte de } M_2 \Rightarrow \boxed{I_{D2} = 769 \mu\text{A}}$

Nudos en  $V_{O1}$ :  $I_{D2} + \frac{I_{BIAS}}{3} = I_{D1} + I_{D3}$

$\Rightarrow I_{D3} = I_{D2} + \frac{I_{BIAS}}{3} - I_{D1} = 269 \mu\text{A} \Rightarrow \boxed{I_{D3} = 269 \mu\text{A}}$

$V_O = R_L I_{D3} = 5,38 \text{ V} \Rightarrow \boxed{V_O = 5,38 \text{ V}}$

Asumo  $M_3$  saturado:

$I_{D3} = \frac{\beta_p}{2(1+\delta_p)} (V_{O1} - V_{BIAS3} - |V_{top}|)^2$   
 $\Rightarrow V_{O1} = V_{BIAS3} + |V_{top}| \pm \sqrt{\frac{2(1+\delta_p)I_{D3}}{\beta_p}} = 8,59 \text{ V}$   
 por condición de no corte de  $M_3 \Rightarrow \boxed{V_{O1} = 8,59 \text{ V}}$

Verifico que  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$  estén saturados:

$M_1: \begin{cases} V_{SB} = 0\text{V} \\ V_P = \frac{V_{GB} - V_{ton}}{1+\delta_n} = \frac{V_{BIAS1} - V_{S1} - V_{ton}}{1+\delta_n} = 0,577\text{V} \\ V_{DB} = V_{O1} - V_{S1} = 4,94\text{V} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{SB} < V_P \checkmark \\ V_{DB} > V_P \checkmark \end{cases}$

$M_2: \begin{cases} V_{BS} = 0\text{V} \\ V_P = \frac{V_{BG} - |V_{top}|}{1+\delta_p} = \frac{V_{DD} - V_{BIAS2} - |V_{top}|}{1+\delta_p} = 0,769\text{V} \\ V_{BD} = V_{DD} - V_{O1} = 1,41\text{V} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{BS} < V_P \checkmark \\ V_{BD} > V_P \checkmark \end{cases}$

$M_3: \begin{cases} V_{BS} = 0\text{V} \\ V_P = \frac{V_{BG} - |V_{top}|}{1+\delta_p} = \frac{V_{O1} - V_{BIAS3} - |V_{top}|}{1+\delta_p} = 0,454\text{V} \\ V_{BD} = V_{O1} - V_O = 3,21\text{V} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{BS} < V_P \checkmark \\ V_{BD} > V_P \checkmark \end{cases}$

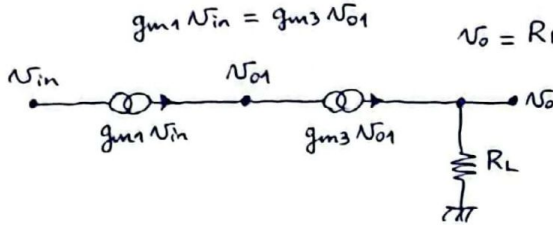
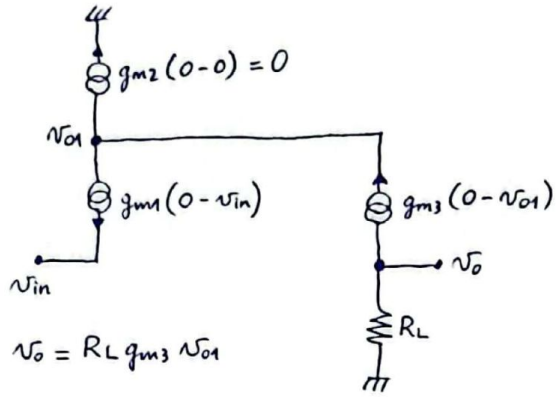
a) ii)  $I_{O1} = I_{D2} - I_{D1} = 19 \mu\text{A} \Rightarrow \boxed{I_{O1} = 19 \mu\text{A}}$

Circula desde el drain de  $M_1$  y  $M_2$  hacia el source de  $M_3$  y la fuente de corriente  $\frac{I_{BIAS}}{3}$ .

Problema (continuación)

b) Modelo AC :

A frecuencias medias,  $C_{in}$  se comporta como un cortocircuito.



$$\Rightarrow \begin{cases} G_1 = \frac{v_{o1}}{v_{in}} = \frac{g_{m1}}{g_{m3}} \\ G_2 = \frac{v_o}{v_{o1}} = g_{m3} R_L \end{cases}$$

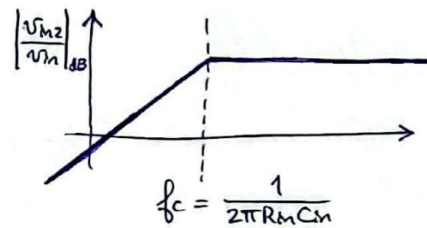
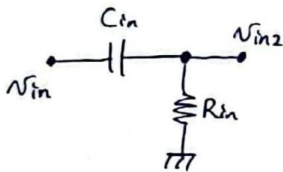
$$g_{m1} = \sqrt{\frac{2\beta_n I_{D1}}{1+\delta_n}} = 2,01 \text{ mS}$$

$$g_{m3} = \sqrt{\frac{2\beta_p I_{D3}}{1+\delta_p}} = 910 \text{ }\mu\text{S}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} G_1 = 2,21 \text{ V/V} \\ G_2 = 18,2 \text{ V/V} \end{cases}$$

$$\Rightarrow G = G_1 G_2 \Rightarrow \boxed{G = 40,2 \text{ V/V}}$$

c) Resistencia de entrada:  $R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{v_{in}}{g_{m1} v_{in}} = \frac{1}{g_{m1}}$



$$\Rightarrow C_{in} = \frac{1}{2\pi R_{in} f_c} = \frac{g_{m1}}{2\pi f_c} \Rightarrow \boxed{C_{in} = 320 \text{ nF}}$$

$$2) V_{o1} = V_z + R_1 I_{pd} < OSW_{max}$$

$$\Rightarrow \boxed{I_{pd} < \frac{OSW_{max} - V_z}{R_1}} \quad I_{pd} < \frac{(9,5 - 2,5)}{1e6} = 2 \mu A$$

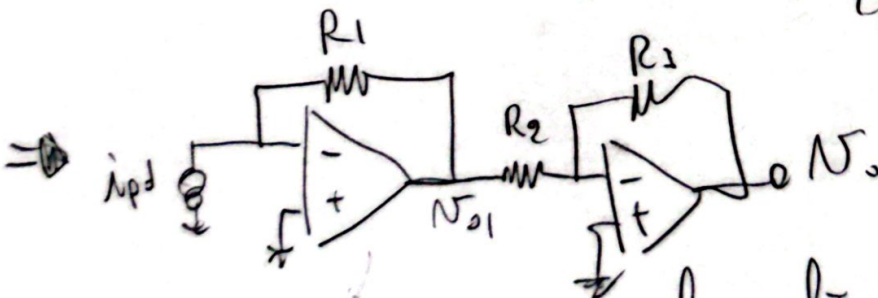
$$b) N_{o1} = +R_1 \dot{I}_{pd} \Rightarrow \frac{N_{o1}}{\dot{I}_{pd}} = +R_1$$

$$\frac{N_o}{N_{o1}} = \frac{-R_3}{R_2 + \frac{1}{C_1}} = \frac{-C_1 R_3}{R_2 C_1 + 1} \Rightarrow \boxed{\frac{N_o}{\dot{I}_{pd}} = \frac{-R_1 R_3 C_1}{R_2 C_1 + 1}}$$

Transferencia de baja frecuencia que no considera  $f_T$  de los OPAMPs.

$$\boxed{f_L = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}} \Rightarrow \boxed{f_L = 1,06 \text{ kHz}} \quad f_L \ll f_T \checkmark$$

$$\text{Para } f_H \text{ asumimos } f \gg f_L \Rightarrow R_2 + \frac{1}{C_1} \approx R_2$$



$$f_{12} = \frac{f_T}{1 + \frac{R_2}{\infty}} = f_T$$

$$f_2 = \frac{f_T}{1 + \frac{R_3}{R_2}} \ll f_1$$

$$\Rightarrow \boxed{f_H = \frac{f_T}{1 + \frac{R_3}{R_2}}}$$

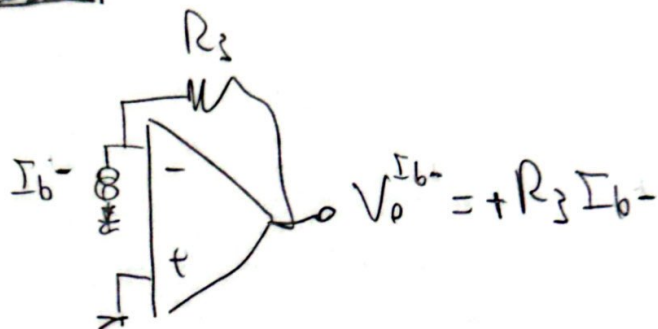
$$\boxed{f_H = 47,6 \text{ kHz}}$$

b) Em banda passante  $\frac{V_o}{\hat{I}_{pd}} = \frac{-R_1 R_3}{R_2}$

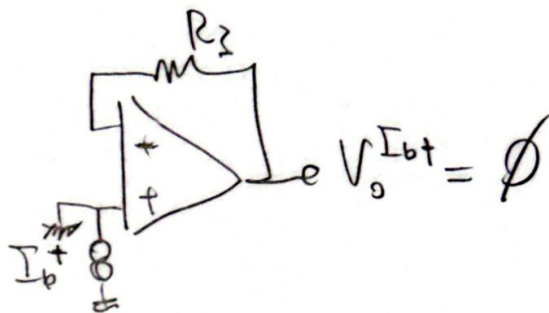
$$\Rightarrow \hat{V}_o = \frac{R_1 R_3}{R_2} \hat{I}_{pd} = \frac{1e^6 \cdot 200e^3}{10e^3} \cdot 50e^{-9} = \frac{50e^{-3} \cdot 200}{10}$$

$$\hat{V}_o = 1 \text{ mV}$$

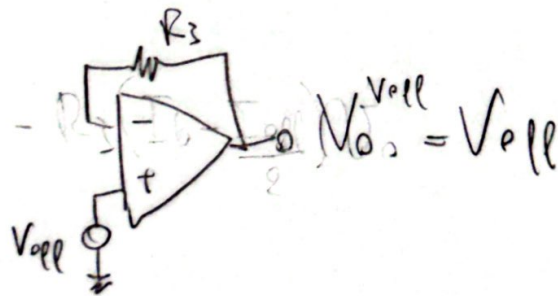
c)  $I_{b^-} \neq \emptyset \Rightarrow$



$I_{b^+} \neq \emptyset \Rightarrow$



$V_{off} \neq 0 \Rightarrow$



$$V_o = V_z \pm V_{off} + R_3 I_{b^-}$$

$$V_o^{MAX} = V_z + V_{off} + R_3 \left( I_{bias} + \frac{I_{off}}{2} \right) = V_z + 0,926 \text{ V}$$

$$V_o^{MIN} = V_z - V_{off} + R_3 \left( I_{bias} - \frac{I_{off}}{2} \right) = V_z + 0,014 \text{ V}$$